

## МЕЖЗВЕЗДНЫЕ ПЛАНЕТЫ

Г. Н. Дремова<sup>1</sup>, В. В. Дремов<sup>1</sup>, А. В. Тутуков<sup>2</sup><sup>1</sup>Российский федеральный ядерный центр, г. Снежинск,<sup>2</sup>Институт астрономии РАН, г. Москва

Лекция посвящена изучению роли гравитационного рассеяния в эволюции планетных систем. В рамках этого механизма объясняется происхождение облака Оорта и свободных от родительской звезды астероидов, комет и планет (АКП).

## INTERSTELLAR PLANETS

G. N. Dryomova<sup>1</sup>, V. V. Dryomov<sup>1</sup>, A. V. Tutukov<sup>2</sup><sup>1</sup>Russian Federal Nuclear Centre, <sup>2</sup>Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences

The lecture is devoted to the study of the role of gravitational scattering in the evolution of planetary systems. This mechanism explains the origin of the Oort cloud and free asteroids, comets, and planets (ACPs) from the parent star.

## Эра экзопланет

На рубеже XX и XXI вв. начался *ренессанс* в изучении планет благодаря таким инновациям в светочувствительной приемной аппаратуре, как адаптивная оптика, интегральные полевые спектрографы, интерферометры... Телескопы нового поколения позволили улавливать «шум» планет в «дрожании» лучевой скорости и/или блеска родительской звезды.

С обнаружения первой планеты вблизи  $PSR1257 + 12$  в 1992 г. [1] началась эра экзопланет, которая вывела концепцию планеты за границы Солнечной системы и изменила отношение к ним. Ранее ассоциируемое с ближним космосом, сегодня изучение планет несет космологический аспект: в событиях микролинзирования регистрируются межзвездные планеты как в Галактике, так и за ее пределами [2]. Чтобы понять причины выбросов планет из родительских звездных систем, обратимся к Солнечной системе.

## Солнечная система

Знакомое с детства словосочетание «Солнечная система» сегодня как никогда представляет труднейшую загадку в вопросах ее происхождения, размеров и количественной оценки планетных тел. Ее сложно организованная структура включает главный пояс астероидов, пояс Койпера—Эдварта, рассеянный диск транснептуновых объектов, облако Оорта.

Все, за исключением последнего, наблюдательно подтверждены. Но другие звезды также имеют планетные диски и, возможно, свои экзосоветные облака, которые извне, может быть, «легче» наблюдать. Уже начата программа поиска ледяных экзосоветов по картам реликтового излучения, на которых мог быть запечатлен их тепловой сигнал [3].

Солнечная система формировалась в ходе долгой, сложной эволюции, определяемой балансом гравитации, момента вращения, магнитного поля, излучения звезды и ряда других факторов, например, гравитационного рассеяния. Этот процесс ответствен за структуру Солнечной системы и оказывается важным не только на стадии столкновительной аккумуляции планетезималей.

## Гравитационное рассеяние

Механизм гравитационного рассеяния сопровождает все этапы планетной сборки — от пылинок до планет-гигантов. Одним из его следствий является орбитальный резонанс, в процессе которого стабилизируется часть планетной подсистемы, в то время как ее другая часть рассеивается, формируя периферию. Важную роль в этом рассеянии играют планеты-гиганты, которые при участии родительской звезды создают условия гравитационного маневра для системы своих спутников (АКП-объектов).

Границы устойчивости орбит оцениваются из анализа размеров сферы Хилла  $R = 0.4a \cdot (m/M)^{1/3}$ , здесь  $m$  — масса планеты;  $M$  — масса звезды;  $da$  — разница больших полуосей соседних планет. При  $m = 10^{-3}M$  орбиты соседних планет в пределах  $da/a = 0.08$  будут неустойчивы. Теоретические оценки и наблюдаемое распределение планет по  $a$  дают условие устойчивости орбит соседних планет:  $da/a = 0.25$  [4].

Условие выброса АКП-объекта при гравитационном взаимодействии с планетой массы  $m$  и радиусом  $r$ , находящейся на орбите с большой полуосью  $a$  около звезды с массой  $M$ :  $m/r > 1/k^2 \cdot M/a$ . Гравитационное ускорение, сообщаемое планетой АКП объекту  $Gm/r^2$ , дает изменение скорости  $\Delta v = k \cdot Gm/(rv)$ , где  $k$  — константа, зависящая от геометрии столкновения;  $v = (Gm/r)^{1/2}$ . Для освобождения АКП  $\Delta v$  должно превышать параболическую скорость АКП-объекта на орбите планеты-ускорителя  $(GM/a^{1/2})$ .

АКП-объекты, не достигшие параболической скорости, становятся членами облака Оорта. Пример хаотического гравитационного рассеяния астероидов и комет демонстрирует система спутников Юпитера, имитирующих свое облако «Оорта». Аккумуляционную работу выполняют и планеты земной группы. Теоретические модели [5] предсказывают, что Земля также окружена облаком захваченных астероидов. Пока открыты две такие *минилуны*: 2006 RH120 и 2020 CD3 [6].

Актуальны наблюдения за метеорами, созданными земными до входа в атмосферу метеороидами. Изучение их орбит позволило установить, что до 30 % последних имеют ретроградные относительно Солнечной системы орбиты [7] и гиперболические для уровня орбиты Земли скорости [8], что позволяет сортировать их принадлежность к облаку Оорта и общему планетному полю нашей Галактики.

## Моделирование АКП-рассеяния

Первые попытки численного моделирования образования облака Оорта на шкале 4 млрд лет были предприняты Дунканом и др. [9]. В данной же работе мы моделируем начальную стадию «разогрева» АКП-системы за счет взаимодействия с планетами-гигантами. Задается система Солнце, Юпитер и  $10^4$  АКП, однородно распределенных в торе с диаметром сечения 0.1 а. е. с дисперсией скоростей 10 % от кеплеровской скорости на орбите Юпитера (рис. 1, а). Предполагается, что АКП взаимодействуют только с Солнцем и Юпитером. При подлете к Юпитеру или Солнцу на расстояние, меньшее их радиуса, АКП исключается из счета. Прямое численное интегрирование движения АКП в гравитационном потенциале Солнце—Юпитер проводится в рамках алгоритма Верлета и Вейса [10].

Хаотизация АКП-орбит изучалась на шкале  $10^5$  лет, на которой проявилась динамика разлета системы. Например, при  $t = 55\,000$  лет хорошо заметны два разрыва в планетном торе (рис. 1, б). Первый, в нижней части кольца, соответствует положению Юпитера, погруженного в АКП-облако. Второй, вверху кольца, — в точке орбиты Юпитера, противоположной его текущему положению. Его происхождение связано с эффектами вековой эволюции планетного тора. Гравитационное поле Солнце—Юпитер не обладает азимутальной симметрией, что приводит к нарастанию возмущений, которые становятся заметными

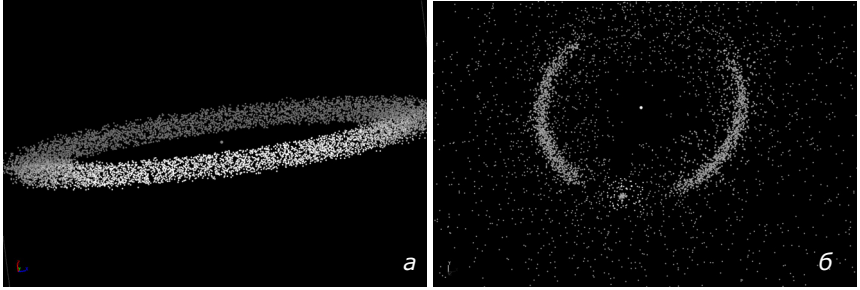


Рис. 1. Пространственная конфигурация АКП тора:  $t = 0$  (а) и  $t = 55\,000$  лет (б)

через тысячу оборотов Юпитера. С течением эволюции АКП стягиваются в дуги в окрестностях точек Лагранжа  $L_4$  и  $L_5$ , в местах обитания «троянцев» и «греков».

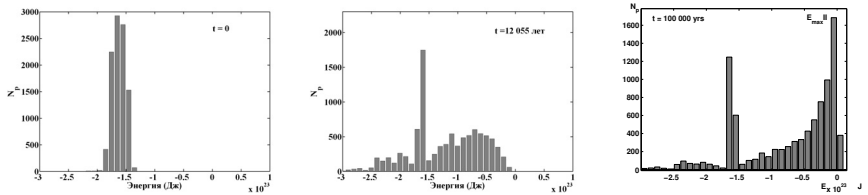


Рис. 2. АКП-распределение по величине полной энергии: а —  $t = 0$ ; б — 12 000; в —  $10^5$  лет

На рис. 2 показаны распределения АКП-объектов по величине их полной энергии на разные моменты времени. На первом графике выделяется максимум, который соответствует начальному состоянию планетного тора. Со временем главный максимум расплывается, и начинает вырисовываться вторичный пик, в котором «скрыта» информация о формирующемся облаке Оорта. Постепенно вторичный пик смещается в сторону положительных значений энергии за счет подпитки новыми АКП-объектами из главного максимума.

Даже за этот небольшой интервал времени  $\sim 10^5$  лет проявилась устойчивая тенденция эволюции планетного тора в АКП-облако и образования свободных АКП-объектов, пространственная скорость которых относительно Солнца 1—5 км/с (рис. 3, а). Гравитационное рассеяние не единственный способ генерации межзвездных планет. Их появление может быть вызвано возмущениями близко проходящих звезд поля. Но совершенно другой порядок скоростей выброса АКП реализуется в сценарии сближения планетной системы со сверхмассивной черной дырой.

## АКП-сближение со сверхмассивной черной дырой

Моделируется сближение планетной системы (АКП-тор в системе Солнце—Юпитер) из бесконечности ( $10^5 R_\odot$ ) в окрестность черной дыры с массой  $10^6 M_\odot$  на расстоянии  $100 R_\odot$ . Начальная скорость задавалась  $\sim 60$  км/с, орбитальный период  $\sim 3.55$  года. Анализ модельных спектров скоростей позволяет заключить о возможности сверхскоростных выбросов АКП со скоростями 800—1 600 км/с (рис. 3, б). В дальнейшем представляет интерес изучение влияния геометрии сближений на деформацию планетного тора (рис. 3, в).

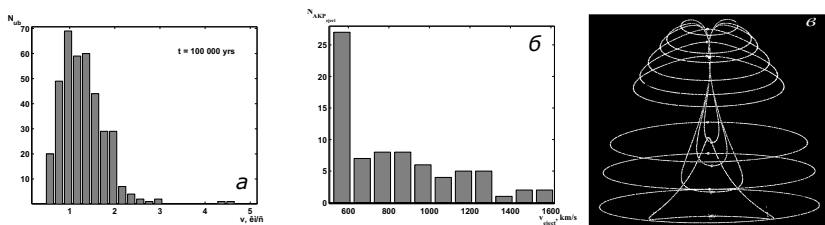


Рис. 3. Спектр скоростей межзвездных и сверхскоростных АКП и искажение планетного тора при прохождении окрестности СМЧД

## Заключение

В коллективных системах, как показали результаты численного моделирования, существуют механизмы, способствующие освобождению части ее компонент, что позволяет утвердиться в выводе о существовании межзвездных планет. Обнаружение межзвездного астероида Oumuamua, комет Borisov и Leonard, а также околосазарных свободных планет подтверждает наличие АКП компоненты, вероятно, у всех галактик [2].

## Библиографические ссылки

- [1] Wolszczan A., Frail D. A planetary system around the millisecond pulsar PSR 1257+12 // Nature. — 1992. — Vol. 355. — P. 145–147.
- [2] Bhatiani S., Dai X., Guerras E. et al. Confirmation of planet-mass objects in extragalactic systems // Astrophys. J. — 2019. — Vol. 855. — P. 77–85.
- [3] Orlowski-Scherer J., Baxter E., Devlin M. et al. Characterizing extra-solar Oort clouds with submillimeter-wave observations // Bulletin of the AAS. — 2019. — Vol. 51, iss. 3. — P. 349.
- [4] Tutukov A. Stars and planetary systems // Soviet Astronomy. — 1987. — Vol. 31. — P. 663–669.
- [5] Fedorets G., Gravnik M., Jedicke R. Orbit and size distributions for asteroids temporarily captured by the Earth-Moon system // Icarus.
- [6] Fedorets G., Michelli M., Jedicke R. Characterization of 2020 CD3, Earth's Second Minimoons // Bulletin of the AAS. — 2020. — Vol. 52, № 6. — P. 415–418.
- [7] Narziev M., Chebotarev R., Jopek T. et al. IAU MDC meteor orbits database — A sample of radio-meteor data from the Hissar Observatory // Planet. Space Sci. — 2020. — Vol. 192.
- [8] Siraj A., Loeb A. Discovery of a Meteor of Interstellar Origin // astro-ph/1904.07224. — 2019.
- [9] Duncan M., Quinn T., Tremaine S. The formation and extent of the Solar System comet cloud // Astron. J. — 1987. — Vol. 94. — P. 1330–1338.
- [10] Verlet L., Weis J. J. Equilibrium Theory of Simple Liquids // Phys. Rev. — 1972. — Vol. 5. — P. 939–952.